

文章编号: 0253-2239(2007)03-0437-6

用于三角方向鉴别测量的客观判别模型^{*}

何国经 张建奇 王晓蕊 王世岩

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要: 为减小人为因素对三角方向鉴别测量的影响, 有效提高测量效率, 研究了以机器视觉系统替代观察者进行三角方向鉴别测量的途径, 建立了一种专门针对三角方向鉴别测量的客观判别模型。该模型以人眼视觉系统对信号的处理过程以及人眼视觉系统的主要效应为基础, 利用方向通道滤波器实现图像信号分解, 通过计算视觉特征矢量相关度, 实现三角形靶标方向的判别。结合凝视型成像系统虚拟样机提供的三角形靶标, 进行了客观判别模型与观察者的判别性能对比实验, 并给出三组不同靶标尺寸下的对比实验结果。实验结果表明, 客观判别模型很好地预测了观察者的判别性能。

关键词: 成像系统; 三角方向鉴别测量; 客观判别模型; 人眼视觉系统

中图分类号: TN216 文献标识码: A

An Objective Discrimination Model for Triangle Orientation Discrimination Threshold Measurement

He Guojing Zhang Jianqi Wang Xiaorui Wang Shiyan

(Institute of Technological Physics, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: To reduce the influence of factitious factors on triangle orientation discrimination (TOD) threshold measurement and so enhance the measurement efficiency, a machine vision system to perform TOD instead of human observers was studied, and an objective discrimination model (ODM) for TOD was developed. Based on the main effect and course of signal processing of human visual system (HVS), ODM uses oriented filters to extract essential information from image-signal and discriminate the orientation of a triangle by comparing the visual character vectors with standard ones. With the triangle images generated by the virtual staring imaging system, experiments were held to compare the performance of ODM with human observers' one. Three groups of experimental results of different triangles size were given and the results show that ODM can predict the observers' performance well.

Key words: imaging system; triangle orientation discrimination (TOD) threshold measurement; objective discrimination model (ODM); human visual system (HVS)

1 引 言

红外成像系统性能评估一直是人们非常关心的问题。为了满足不断发展的新型成像系统的性能评估要求, 人们一直在寻求更好的性能评估方法。三角方向鉴别(TOD)法是近年来新提出的一种红外成像系统性能评估方法, 由于理论基础强, 可操作性好, 能够很好地用于真实目标的获取性能预测, 并且

适合于扫描型、凝视型红外成像系统, 因而受到了极大的关注, 被认为是一种适用于未来新型红外成像系统性能表征的新方法^[1,2]。

三角方向鉴别法使用均匀背景中的等边三角形(有四个可能的方向: 上、下、左、右)作为测试样条, 由尺寸和热衬比度进行表征。根据参考文献[1]中描述的测量步骤可以看出, 三角方向鉴别曲线测量

^{*} 国家自然科学基金(6027705, 60477038)和高等学校博士点专项科研基金(20030701003)资助课题。

作者简介: 何国经(1978—), 男, 广西玉林人, 博士研究生, 主要从事光电成像系统效能评估的研究。

E-mail: gjhe@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 张建奇(1960—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事光电成像系统效能评估, 系统设计与实时图像处理, 3D场景建模与仿真等研究。E-mail: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-04-04; 收到修改稿日期: 2006-07-21

实验的工作量非常大,观察者非常容易疲劳,导致主观心理和客观状态不稳定,使得测量结果不能准确反映实际情况。因而有必要为三角方向鉴别测量设计一种客观判别模型(ODM),使测量免受人为因素的干扰,同时该模型必须能够准确反映人眼的判别性能,以获取更加准确的测量结果。从功能上讲,客观判别模型应该能够模拟人眼视觉系统对信号的处理,并能利用经过了视觉系统处理的信号中包含的信息,进行三角形靶标方向的判别。从效果上看,模型必须能反映观察者的判别能力,最佳的结果是客观判别模型与观察者的判别性能完全相同。

针对用于三角方向鉴别测量的客观判别模型的设计,目前公开发表的研究工作和成果还很少,仅见 Maarten A 等^[3]尝试性地提出过一种基于金字塔模型和墨西哥草帽函数的模型。该模型采用带通滤波器组来模拟人眼视觉神经元形状和空间分布特征造成的视觉过程,用相关度作为判别准则。然而,该模型存在几点不足:首先,模型中没有考虑视觉非线性效应、衬比度敏感度效应和掩盖效应等视觉系统效应,这使得模型无法准确反映人眼的视觉响应过程;其次,模型没有考虑视觉的方向感知特性,而对于三角方向鉴别测量,方向感知是至关重要的。为进一步提高客观判别模型的测量准确度,必须在模型中考虑视觉系统效应,同时引入方向感知特性对靶标方向判别的影响。

基于以上分析,本文提出了一种用于三角方向鉴别测量的客观判别模型。该模型包含非线性效应、多通道结构、衬比度敏感度效应等人眼视觉系统(HVS)的主要效应,同时在判别过程中考虑视觉方向感知的影响。利用所建的模型,结合由凝视型成像系统虚拟样机提供的三角形靶标,进行了包含多达 3000 幅图像的客观判别模型与观察者的判别性能对比实验。实验结果表明,客观判别模型与观察者的判别能力非常接近,能够比较准确地预测人眼的判别性能。

2 模型框架

本模型的基本框架构成如图 1 所示。

将计算机生成的理想三角形靶标图像输入凝视型红外成像系统虚拟样机,虚拟样机模拟实际系统效应,并作用到理想三角形靶标图像上,生成受系统效应调制的结果图像,作为客观判别模型的输入。

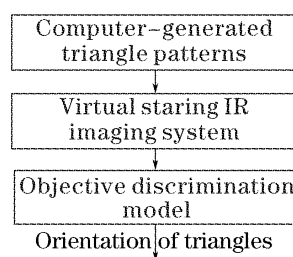


图 1 模型基本框图

Fig. 1 Block diagram of general model

客观判别模型首先根据人眼视觉系统效应,对输入信号进行一系列的处理,而后利用信号所提供的信息,特别是与方向相关的信息,判断出三角形靶标的方向,以此代替观察者进行三角方向鉴别测量。采用统计分析方法,对多次实验的结果进行分析,就可得到客观判别模型的判别性能。

关于红外成像系统虚拟样机,前期已经做了很多的工作,具体参见文献[4,5]。

3 客观判别模型

客观判别模型包括两部分,如图 2 所示,一是人眼视觉系统模型,二是判别模型。人眼视觉系统模型描述视觉系统对外界亮度信号的响应与处理的过程,判别模型描述视觉系统对信息的处理过程,即利用人眼视觉系统模型提供的信号进行信息提取,进而实现方向判别。

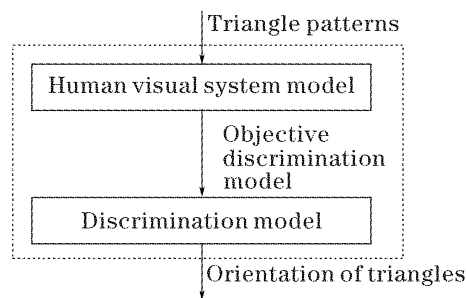


图 2 客观判别模型框图

Fig. 2 Block diagram of objective discrimination model

3.1 人眼视觉系统模型

人眼视觉系统模型主要包括视觉非线性效应、衬比度敏感度效应、多通道结构等三种效应。人眼视觉系统模型的结构框图如图 3 所示。

1) 视觉非线性效应。根据韦伯-费希纳(Weber-Fechner)定律,人眼对亮度的响应特性呈对数型^[6~8],可由下式进行描述:

$$S = K \ln B + K_0, \quad (1)$$

式中 S 为感知亮度, B 为客观亮度, K_0 为常量, K 为与整幅图像的平均亮度相关的常量。

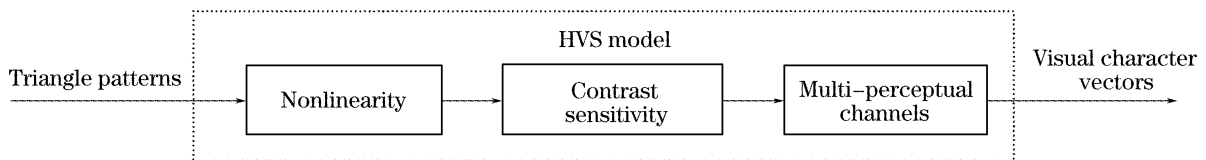


图3 人眼视觉系统模型框图

Fig. 3 Block diagram of human visual system (HVS)

2) 衬比度敏感度效应。信号的空间频率不同, 则人眼对其衬比度的敏感程度也是不同的, 这种关系由衬比度敏感度函数(CSF)进行描述。广泛应用的衬比度敏感度函数已分别由 Mannos 和 Sakrison、Ngan、Nill 给出。考虑到 Mannos 和 Sakrison 进行衬比度敏感度函数测量时所采用的方法与三角方向鉴别测量实验的相似性, 这里采用他们给出的衬比度敏感度函数^[9,10]:

$$H(f) = a(b + cf)\exp(-cf)^d, \quad (2)$$

式中 f 为空间角频率, a, b, c, d 为常量。

3) 多通道结构。视觉神经元能响应的信号的频率是有限的, 大脑通过感知通道把谱段信号进行分解。所谓的感知通道, 实际上是一系列与空间频率、时间频率以及方向等因素相关的带通滤波器, 滤波器的结构可以用 Gabor 函数描述^[11]。滤波器的输出表征了输入信号在特定空间频率、特定方向上的特征, 因而多通道结构实际上是把信号进行特征

分离(提取)。我们把多通道结构的一组输出称为信号的视觉特征矢量。

在三角方向鉴别测量中, 靶标图像是静止的, 且持续数秒, 而时域视觉对 1 Hz 以下的信号的增益非常接近 1, 故时域通道不需考虑, 因而通道滤波器可简化到二维, 仅与空间频率以及方向相关。滤波过程由下式描述:

$$g(\theta, \nu) = \mathcal{F}_{\text{FFT}}^{-1}[F(\theta, \nu) \cdot \mathcal{F}_{\text{FFT}}(f)], \quad (3)$$

式中 \mathcal{F}_{FFT} 、 $\mathcal{F}_{\text{FFT}}^{-1}$ 分别为傅里叶变换与逆变换, f 为输入信号, $F(\theta, \nu)$ 、 $g(\theta, \nu)$ 分别为多通道结构中方向与中心频率分别为 θ, ν 的通道滤波器及其输出。方向视觉由 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 等 8 个方向带组成。空域视觉分为 5 个不同频率带, 中心频率分别为 0, 2, 4, 8, 16 (cycles per degree, cpd), 其中 0 频率带是各向同性的。

图 4 是方向向下的标准三角形靶标图像以及几个不同通道的输出。

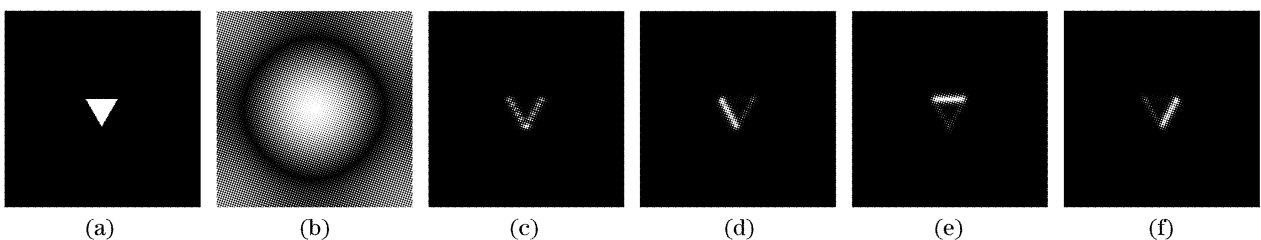


图4 方向向下的标准三角形靶标图像及 5 个不同通道的输出

Fig. 4 Standard down-orientation triangle and outputs of 5 different perceptual channels

图 4 中, (a) 为方向向下的标准三角形靶标图像, (b) 为各向同性通道的输出, 即 $g(0, 0)$, (c) 为 $g(0, 16)$, (d) 为 $g(\pi/4, 16)$, (e) 为 $g(\pi/2, 16)$, (f) 为 $g(3\pi/4, 16)$ 。从图 4 中可见, 各向同性通道输出的是原始图像的整体信息, 如图像强度、基本形状与亮度分布等, 带方向特性的通道则有效地分离出了目标的特征, 这些特征具体地表现了目标的性质, 特别是目标的指向。对三角形靶标方向判别而言, 这些特征是至关重要的。这也充分说明了在人眼视觉系统模型的多通道结构中引入与方向相关的通道描述的重要性。

以 g_{ij} 替代 $g(\theta, \nu)$, 其中 i, j 分别为 θ 和 ν 取值空间各元素的标识, 由此得到原始图像的分解矢量

\mathbf{G} , 即视觉特征矢量:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix}.$$

3.2 判别模型

判别模型将待测靶标的视觉特征矢量与标准靶标的视觉特征矢量进行比较, 结合相关度准则, 完成三角形靶标方向的判别。其结构框图如图 5 所示。

对于特定尺寸三角形靶标的三角方向鉴别实验, 先获取四个方向的标准三角形靶标的视觉特征矢量 \mathbf{G}_{up} 、 \mathbf{G}_{down} 、 \mathbf{G}_{left} 和 $\mathbf{G}_{\text{right}}$ 作为标准矢量。对待测靶标, 同样计算得到其视觉特征矢量, 记为待判矢量 \mathbf{G} 。计算待判矢量与标准矢量的相关度, 取相关度

最大的标准矢量方向作为待判矢量方向。

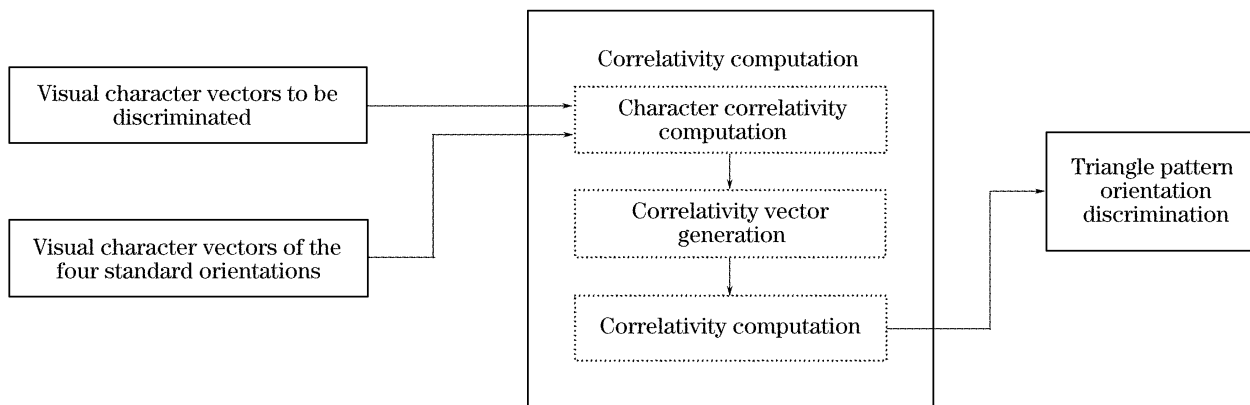


图 5 判别模型框图

Fig. 5 Block diagram of decision Model

待判矢量与标准矢量的相关度的计算步骤及描述如下:

1) 计算视觉特征矢量间的特征相关度,即计算待判矢量与标准矢量间相应元素的相关度,如式(4)所示。

$$V_{kij} = (g_{kij} \times g_{ij}), \quad (4)$$

式中 $k \in [\text{up}, \text{down}, \text{left}, \text{right}]$, g_{kij} 和 g_{ij} 分别为 \mathbf{G}_k 和 \mathbf{G} 的 (i, j) 分量。由于 g_{kij} 与 g_{ij} 均为二维矩阵(图像),上式中的乘法定义为相应像素点灰度值乘积之和。

2) 生成相关度矢量。对特定的 (i, j) , 令四个特征相关度值中最大值所对应的标准矢量的相关度矢量中的相应元素值为 1, 其余三个标准向量对应的相关度矢量的相应元素值为 0, 即

$$C_p = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \dots \\ \dots & 1 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \leftarrow (i),$$

(j)

$$C_q = \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \dots \\ \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \leftarrow (i),$$

(j)

$$p, q \in [\text{up}, \text{down}, \text{left}, \text{right}]$$

且

$$V_{pij} = \max(V_{upij}, V_{downij}, V_{leftij}, V_{rightij}), p \neq q.$$

对视觉特征矢量中的所有元素重复上述计算, 得到待判矢量与四个标准矢量的相关度矢量。

3) 计算待判矢量与标准矢量的相关度。待判矢量与标准矢量的相关度 $\text{Cor}(\mathbf{C}_k)$ 定义为相应相关度矢量的所有元素之和, 即

$$\text{Cor}(\mathbf{C}_k) = \sum_{i,j} c_{kij}, \quad (5)$$

其中 $\text{Cor}()$ 为计算相关性的算子。

取相关度最大的标准矢量方向作为待判矢量的方向。

采用统计分析方法, 对 N 幅相同三角形尺寸、相同衬比度、相同程度成像系统效应作用的靶标图像, 统计客观判别模型的判别结果, 可以得到客观判别模型对一定尺寸、一定衬比度的靶标图像的正确判别概率。让观察者也同一组靶标图像进行判别, 同样统计其正确判别概率。将两者的结果进行比较, 即可得到客观判别模型与观察者的判别性能的差异。

4 实验与结果分析

4.1 实验

实验的过程如下: 利用虚拟样机生成大量不同尺寸、不同衬比度的靶标图像, 供客观判别模型和观察者进行判别, 统计各自的正确判别概率, 并将两者的结果进行比较, 得出两者之间的差异。

实验中共有 3 名观察者参与测试。3 人均不是专业人员, 但在实验前接收过必要的培训, 其视力均在 1.0 以上。测试时, 人眼与显示器距离保持在 0.9~1 m。

实验中共使用了 3000 帧靶标图像, 包含三种不同尺寸、25 种不同衬比度下的 75 组图像, 每组由 40 幅叠加相同程度的成像系统效应的图像组成, 其中, 4 种三角形指向的图像各占 10 幅。

图 6、图 7、图 8 是不同靶标尺寸下三名观察者与客观判别模型测量结果的对比曲线。横坐标表示靶标衬比度, 纵坐标是正确判别概率。空心方块点、圆点和三角形点标识的曲线为三名观察者的测量结果, 实心三角形曲线为客观判别模型的测量结果。

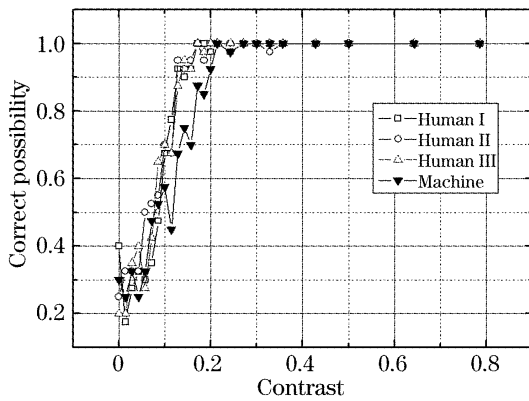


图6 观察者与客观判别模型测量结果的对比
(三角形靶标尺寸为 3.6 mrad)

Fig. 6 Experimental results of human observers and objective discrimination model (Triangles size: 3.6 mrad)

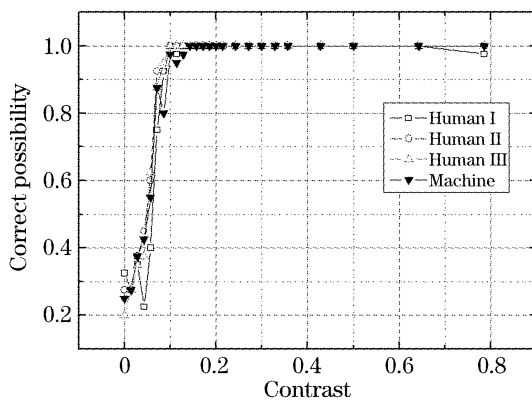


图7 观察者与客观判别模型测量结果的对比
(三角形靶标尺寸为 7.2 mrad)

Fig. 7 Experimental results of human observers and objective discrimination model (Triangles size: 7.2 mrad)

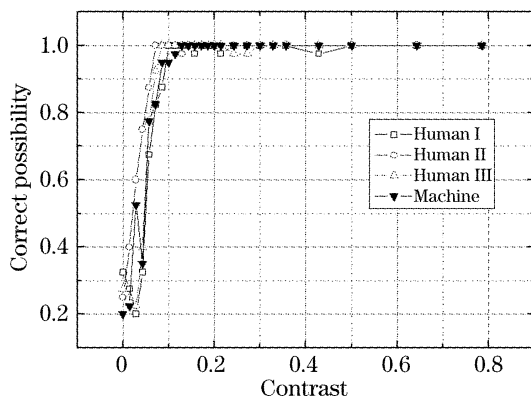


图8 观察者与客观判别模型测量结果的对比
(三角形靶标尺寸为 10.8 mrad)

Fig. 8 Experimental results of human observers and objective discrimination model (Triangles size: 10.8 mrad)

4.2 分析与结论

从实验结果,可以得到以下的分析与结论:

1) 三名观察者的测量曲线基本一致,说明测量结果基本代表观察者的平均性能。

2) 客观判别模型测量曲线与观察者的测量曲线吻合的比较好,而且随着三角形靶标尺寸的增大,客观判别模型的测量结果更加融入到观察者的测量结果中,曲线吻合度提高。这说明客观判别模型能够预测观察者的判别性能。

3) 观察者在判别过程中,会出现误判现象,即做出了正确的判断,手却点错了按键,导致得到的是错误的判别结果,如图6中的数据点(0.329, 0.975)、图7的(0.786, 0.975)和图8的(0.429, 0.975)、(0.271, 0.975)等。误判是由于观察者过于疲惫或是其他因素导致注意力不能集中造成的。客观判别模型不会出现这样的错误,因而客观模型得到的数据能更好地反映实际情况。

4) 在曲线下降区的右半区域(高衬比度端),观察者的判别能力优于客观判别模型,而在左半区域(低衬比度端),客观判别模型的能力高于观察者。原因是,人眼有空间积分和时间积分能力,即人眼能够把空间信息有效整合,同时能够在时间上做积累处理,提高信噪比,使得人眼能更高效地利用提供的信息,提高获取的信号的信比度。客观判别模型没有类似人眼的空间积分、时间积分能力,从这方面讲,人的判别能力要高于客观模型。在稳定区,即判别概率接近1的区域,人的判别能力的优势没有能体现出来,是因为图像提供了充足信息,足以弥补客观判别模型判别能力的不足。在曲线下降区的高衬比度端,图像提供的有用信息量迅速下降,人眼能有效利用图像信息的能力得到了很好的体现。然而,人眼通过空、时积分等能力提高信号衬比度的能力是有限的,当图像衬比度低于一定的程度后,由于人眼内部噪声的存在,不能再通过空、时积分提高信噪比,这时,人的判别能力迅速下降。而对于客观判别模型,其信息获取率和利用率是稳定的,而且没有内部噪声的干扰(从建立一个模拟人眼的判别模型的目的来看,这是模型的不足),所以其判别能力的下降相对缓慢。故在曲线下降段的低衬比度端,客观判别模型的能力强于人眼。

根据上面的分析,下一步工作将是为客观判别模型设计空、时积分模型,提高其对信息的利用率,同时为其添加适当的噪声模型,模拟人眼的内部噪声。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Chang Honghua *et al.*. A new method to characterize IR imaging system performance [J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(2): 24~28 (in Chinese)
王晓蕊,张建奇,常洪花等.一种表征红外成像系统性能的新方

法[J]. 红外技术, 2003, **25**(2): 24~28

2 Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Feng Zhuoxiang *et al.*. Triangle orientation discrimination threshold curve prediction based on staring thermal imaging simulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1036~1041 (in Chinese)
王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥 等. 凝视热成像系统的三角方向鉴别阈值曲线预测[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1036~1041

3 Maarten A. Hogervorst, Piet Bijl, J. Mathieu Valetou. Capturing the sampling effects; a TOD sensor performance model [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4372**: 62~73

4 He Guojing, Zhang Jianqi. Virtual IR imaging guiding system model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 338~342 (in Chinese)
何国经, 张建奇. 红外成像制导系统虚拟样机[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(4): 338~342

5 Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Feng Zhuoxiang *et al.*. Sampled IR imaging system simulation and MRTD prediction [J]. *J. Infrared Millimeter and Waves*, 2004, **23**(6): 436~440 (in Chinese)
王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥 等. 采样红外成像系统仿真及最小可分辨温差预测方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(6): 436~440

6 Norman B. Nill. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. *IEEE*

Transactions on Communications, 1985, **com-33**(6): 551~557

7 Yang Jun, Wang Cheng, Wang Yunfeng. A SNR method of evaluating image quality based on the HVS model [J]. *J. Hebei University of Science and Technology*, 2002, **23**(4): 80~85 (in Chinese)
杨 军, 王 成, 王云峰. 一种基于 HVS 模型的图像质量信噪比评价方法[J]. 河北科技大学学报, 2002, **23**(4): 80~85

8 Wei Chongkui, Cheng Lizhi. An image quality measure scheme in the perceptual field via masking [J]. *J. Image and Graphics*, 2004, **9**(2): 195~200 (in Chinese)
魏崇奎, 成礼智. 一种基于掩盖效应的感知域图像质量评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(2): 195~200

9 Sang Ho Kim, Jan P. Allebach. Impact of HVS models on model-based halftoning [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(3): 258~269

10 Bowonkoon Chitprasert, K. R. Rao. Human visual weighted progressive image transmission [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1990, **38**(7): 1040~1044

11 Christian J. van den Branden Lambrecht. A working spatio-temporal model of the human visual system for image restoration and quality assessment applications [C]. *IEEE Proc. ICASSP '96*, 1996, **4**: 2291~2294



中国知名光学期刊 有奖订阅抽奖名单揭晓

中国知名光学期刊

- 《光学学报》
- 《中国激光》
- 《光子学报》
- 《应用光学》
- 《应用激光》
- 《光散射学报》
- 《光电子技术》
- 《光学精密工程》
- 《中国激光医学杂志》
- 《红外与毫米波学报》
- 《量子电子学报》
- 《强激光与粒子束》
- 《原子与分子物理学报》
- 《光学与光电技术》
- 《激光生物学报》
- 《红外与激光工程》
- 《中国激光医学杂志》
- 《大气与环境光学期刊》
- 《激光与光电子学进展》
- Chinese Optics Letters

于2006年8月~12月, 联合举行了用户有奖订阅活动, 读者反馈十分踊跃。经过公开抽奖, 产生了13位获奖者。

一等奖

- 阎军 (北京)
- 赵顺明 (苏州)

二等奖

- 吴谨 (北京)
- 石枫 (太原)
- 佟成国 (哈尔滨)

三等奖

- 朱启亚 (扬州)
- 丁晔 (绵阳)
- 胡幼彪 (上海)
- 张伟珠 (上海)
- 卢常勇 (武汉)
- 杨晓山 (北京)
- 吴立 (北京)
- 张庆礼 (合肥)



对本次活动的参与者表示衷心的感谢! 本活动最终解释权归光学期刊联合编辑部所有